

D2D通信中用户意识与信息耦合传播建模分析

甘臣权*^① 刘安棋^① 张祖凡^① 祝清意^②

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(重庆邮电大学网络空间安全与信息法学院 重庆 400065)

摘要: 设备到设备(D2D)通信中信息传输过程不仅受物理通信条件影响,还与用户动态属性密切相关。为探讨信息传输与用户意识扩散之间的内在关系,该文将信息传输与用户意识扩散视作两种传播过程,并引入过程影响因子刻画两者相互作用。进一步地,建立了一种信息与用户意识耦合传播动力学模型,并进行了全面分析。其中,理论分析证明了模型平衡点的存在唯一性及其全局稳定性,这揭示了D2D通信中信息与用户意识耦合传播的最终状态。实验分析也验证了该理论结果。同时,与传统模型和未考虑过程影响的传播模型对比发现所提模型能扩大信息传播规模且能更准确刻画信息传播过程。

关键词: D2D通信; 用户意识; 过程影响因子; 耦合传播模型; 全局稳定性

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)08-2767-10

DOI: [10.11999/JEIT210535](https://doi.org/10.11999/JEIT210535)

Modeling and Analysis of User Awareness and Information Coupling Propagation in D2D Communications

GAN Chenquan^① LIU Anqi^① ZHANG Zufan^① ZHU Qingyi^②

^①(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(School of Cyber Security and Information Law, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The information transmission process in Device to Device (D2D) communications is not only affected by physical communication conditions but also closely related to the dynamic properties of users. To explore the internal relationship between information transmission and user awareness diffusion, they are regarded as two propagation processes, and the interprocess interaction factors are introduced to describe the interaction in this paper. Furthermore, a coupling propagation dynamical model of information and user awareness is established and analyzed comprehensively. Specifically, the existence and uniqueness of the equilibrium and its global stability are proved through theoretical analysis, which reveals the final state of coupling propagation between information and user awareness in D2D communications. The theoretical results are also verified by experimental analysis. Meanwhile, compared with the traditional model and the propagation model without considering the interaction of process, the scale of information propagation can be expanded and the information propagation process can be described more accurately by the proposed model.

Key words: D2D communication; User awareness; Interprocess interaction factor; Coupling propagation model; Global stability

收稿日期: 2021-06-08; 改回日期: 2022-02-19; 网络出版: 2022-03-07

*通信作者: 甘臣权 gcq2010cqu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61702066, 61903056), 重庆市教委科学技术重点研究项目(KJZD-M201900601), 重庆市基础研究与前沿技术
研究计划(cstc2021jcyj-msxmX0761, cstc2019jcyj-msxmX0681), 重庆市高等学校重点实验室资助课题(cqupt-mct-201901)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61702066, 61903056), The Major Project of Science and Technology
Research Program of Chongqing Education Commission of China (KJZD-M201900601), Chongqing Research Program of Basic Research
and Frontier Technology (cstc2021jcyj-msxmX0761, cstc2019jcyj-msxmX0681), The Project Supported by Chongqing Municipal Key Laboratory
of Institutions of Higher Education (cqupt-mct-201901)

1 引言

随着无线通信技术的发展,智能设备满足了人们越来越多的服务需求,然而这也使得移动业务爆炸式增长^[1]。为缓解传统通信模式下基站压力,同时保证高质量信息传输,设备到设备(Device to Device, D2D)通信应运而生。D2D通信是一种终端直连技术,其核心思想是最大限度使局部区域用户有选择性地从邻近用户获得所需内容,从而实现低时延、高频谱利用率。

从通信角度来看, D2D通信是相隔距离较小设备间通信,故通信成功与否很大程度依赖设备轨迹重合概率和通信频率^[2]。作为设备持有者,用户是否参与通信以及与谁通信会极大影响D2D通信性能。基于用户属性的D2D通信已成为研究热点之一^[3]。比如,文献^[4]通过利用用户社交意识来优化协作节点选择,有效提高了D2D数据传输的安全性。文献^[5]针对存在窃听用户的D2D内容共享场景,结合用户意识和社交信任度,提出了一种改进的内容缓存机制以兼顾安全性与缓存效益。文献^[6]基于用户兴趣相似度和移动性,设计了一种针对D2D协作通信的移动感知缓存策略,有效提升了通信效率与稳定性。不难看出,用户意识与D2D通信的结合有助于通信性能提升。然而,意识不仅仅是用户的一种属性,更是一种特殊的信息形式。

从信息传播角度来看, D2D通信可看作是一种设备间信息传输与社会个体感知传递相互作用的过程。人与人之间的意识扩散会促进思想和观点的快速传递,设备之间的D2D通信会建立起无处不在的连接,满足视频、语音等多媒体数据高速传输^[7,8]。实际上,二者融合已成为信息传播重要途径之一。例如,文献^[9]基于加权网络和社会传染动力学研究了D2D内容传播,分析了在有认知能力的网络中意识与网络异质性对信息传播的影响。文献^[10]提出了一个考虑用户意识和社会关系的信息扩散模型,分析了如何加速D2D环境中有益信息传播。文献^[11]根据用户意识水平来区分信息识别能力,从而对移动社交网络中的谣言传播进行建模,表明了用户意识对信息扩散的影响。不幸的是,这些工作往往将用户意识与设备当作一个整体进行研究,并未单独考虑用户意识的本身扩散行为。

事实上,意识扩散与信息传输是相互影响的。文献^[12,13]已表明绝大多数传播网络都不是独立存在的,不同传播过程往往相互影响。信息耦合传播也是近年来研究人员关注热点之一,但主要针对不同类型网络^[14-16]、疾病-信息^[17-19]传播规律进行建模分析, D2D通信中用户意识与信息耦合传播的规律

仍有待研究。一般地,这些耦合传播模型着重于分析网络间耦合方式、耦合程度以及节点间关联程度来研究层间交互,并未充分考虑用户意识影响,也未用数学语言明确表示层间耦合关系。同时,疾病-信息传播模型中往往假设意识与信息异步,即疾病早于意识传播。而对信息传播而言,意识与信息是同步演化的,显然现有模型都无法准确描述该过程。此外,多变的物理环境和多样的个体用户也会使D2D通信中信息传播行为更复杂,仅仅基于网络结构研究信息耦合传播已无法解决上述问题。

为此,本文从信息传播角度出发,在考虑D2D通信中设备间信息传输过程之时,也将用户意识扩散当作一种传播过程加以研究。为表示这两种过程之间的相互作用,分别定义了对应的过程影响因子。进一步地,建立了一种动力学模型来刻画信息与用户意识的耦合传播过程。特别地,所提动力学模型平衡点存在唯一性及其全局稳定性得到了全部证明。与此同时,实验分析也进一步验证了这些理论结果。此外,在同等条件下与传统模型和未考虑过程影响的传播模型进行了多组实验对比,结果表明所提模型能提高信息传播规模且能更准确刻画信息传播过程。

本文后续内容安排如下:第2节描述应用场景,并建立动力学模型;第3节对模型平衡点及其稳定性进行理论分析;第4节对所得理论结果进行实验验证并与传统模型和未考虑过程影响的传播模型进行对比;最后,第5节总结本文工作。

2 系统模型

如图1所示,本文考虑的D2D通信场景主要为开放拥挤区域,通信过程由物理信息传输过程和用户意识扩散过程组成。用户间的信息传播体现为用户意识扩散,其中 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_8\}$,表示用户集合,连边表示存在社会交互。设备间的信息传播体现为链路传输,其中包括基站, D2D设备节点 $DE = \{DE_1, DE_2, \dots, DE_5\}$,蜂窝设备节点 UE_1 以及空闲设备节点 $RE = \{RE_1, RE_2\}$ 。具体来说,公共场所或社区中设备间存在两种通信方式。一种是借助基站进行传统蜂窝通信, $UE_1 \rightarrow DE_1$ 。另一种是设备之间直接进行D2D通信,无需通过基站,用户间可以建立一对D2D链接,如 $DE_1 \leftrightarrow DE_2$,也可以形成多个D2D链接,如 $DE_3 \leftrightarrow DE_4$, $DE_3 \leftrightarrow DE_5$ 。除此之外,两个设备之间因为距离等问题导致通信质量不佳时,空闲设备可作为中继进行协作通信,进而形成一个动态大规模D2D通信网络。

设备间D2D通信虽能高速收发信息,但设备是否自动转发信息取决于其使用用户。用户会根据信

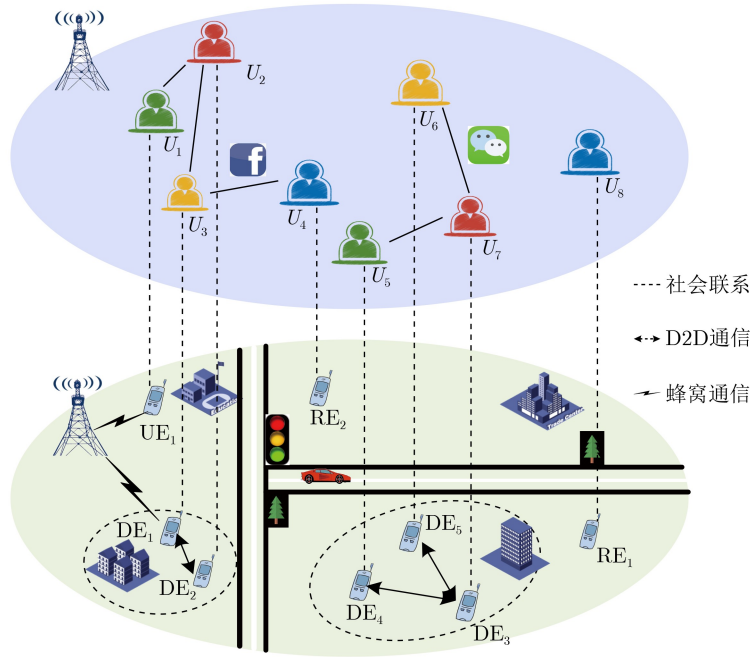


图1 信息与用户意识耦合传播模型

息内容及自身偏好来决定是否向其他用户转发，信息往往会在设备中保存等待处理。这既体现了信息内容对用户意识影响，也说明了用户意识对设备信息传输过程影响。因此，D2D通信中信息传播可视作为一种信息传输与用户意识扩散相互作用的耦合传播过程。

结合上述场景分析，根据用户是否得知信息情况，可假设用户处于以下两种状态之一：

(1) 未知(Unknown, U): 用户未接收到信息，也未意识到信息在传播。

(2) 已知(Known, K): 用户接收到信息，是否进行转发需根据自身偏好以及与其他用户间信任关系等决定。

同理，可假设用户持有的D2D设备处于以下3种状态之一：

(1) 易感(Susceptible, S): 设备还未接收到信息，但随时可能收到。

(2) 感染(Infected, I): 设备接收到其他设备的转发信息，但转发待持有者决策。

(3) 传播(Relay, R): 设备接收到信息并开始转发信息。

显然，这些状态彼此间会相互转化与影响，具体状态转移情况如图2所示，其中表1列出了所有参数的含义。

此外，所定义的过程影响因子作用机制如下：

(1) 设备收到转发信息后变成感染状态，但是否转发待持有者决策。当用户决定转发后，设备才

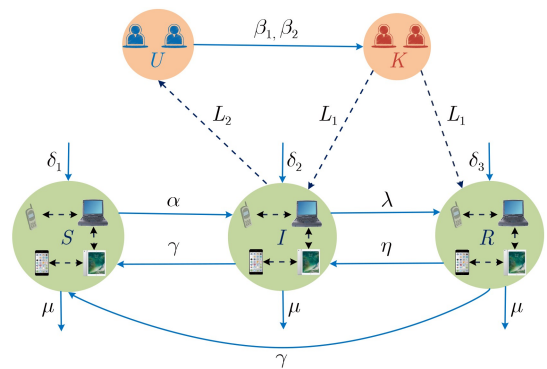


图2 耦合传播模型状态转移图

表1 系统参数

参数	含义
β_1	单位时间用户与相邻用户交互而得知信息的概率
β_2	单位时间用户通过查看持有设备得知信息的概率
α	单位时间设备间物理传输率，即设备间感染率
λ	单位时间设备转发信息的概率
η	单位时间设备停止转发但保留信息的概率
γ	单位时间信息被从设备中删除的概率
δ_1	单位时间新连入的S状态的设备数量
δ_2	单位时间新连入的I状态的设备数量
δ_3	单位时间新连入的R状态的设备数量
μ	单位时间D2D连接中断的概率
L_1	设备信息传输对用户意识扩散的过程影响因子
L_2	用户意识扩散对设备信息传输的过程影响因子

会转发信息。定义 $L_1 = e^\phi$, $\phi \in [-1, 1]$ 是用户意识对设备间信息接收和转发的影响因子。当 $\phi \in [-1, 0)$ 时, 表示用户不愿转发信息; 当 $\phi \in (0, 1]$ 时, 表示用户愿意转发信息; 当 $\phi = 0$ 时, 表示用户处于未知状态, 此时不影响信息传输。

(2) 我们的模型中考虑设备自身性能或中断概率对用户得知信息会造成延迟效应。定义 $L_2 \in [0, 1]$ 是设备间信息传输对用户意识扩散的影响因子, 此时 $\beta_2 = L_2\alpha$ 。当 $L_2 = 0$ 时, 表明设备通信中断; 当 $L_2 = 1$ 时, 表明无额外影响; 当 $L_2 \in (0, 1)$ 时, 表示设备对用户的得知信息有延迟影响。

为便于后续理论分析, 在 t 时刻, 令 $U(t)$, $K(t)$ 分别表示未知状态 U 和已知状态 K 的用户数量, $S(t)$, $I(t)$, $R(t)$ 分别表示未接收信息 S , 接收信息 I , 接收信息并转发 R 的设备数量, $N(t)$ 表示用户总量, 则根据状态转移图和平均场理论^[20]可得状态转移方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU(t)}{dt} &= -\beta_1 U(t)K(t) - \beta_2 U(t)I(t) \\ \frac{dK(t)}{dt} &= \beta_1 U(t)K(t) + \beta_2 U(t)I(t) \\ \frac{dS(t)}{dt} &= -L_1\alpha S(t)R(t) + \gamma I(t) + \gamma R(t) \\ &\quad + \delta_1 - \mu S(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} &= L_1\alpha S(t)R(t) - L_1\lambda I(t) - \gamma I(t) \\ &\quad + \eta R(t) + \delta_2 - \mu I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} &= L_1\lambda I(t) - \eta R(t) - \gamma R(t) + \delta_3 - \mu R(t) \end{aligned} \right\} (1)$$

其中, 初始条件为 $U(0), K(0), S(0), I(0), R(0) \geq 0$ 。

3 模型分析

上节已详细描述和建立了信息与用户意识耦合传播模型, 本节将探讨其动力学行为。主要包括模型平衡点及其稳定性。为便于理解分析过程与结论, 有必要先解释基本术语含义与信息传播的关系。

(1) 动力系统: 主要刻画系统随时间演化的动力学过程^[20]。在本文中, 式(1)就是一个在D2D通信中刻画信息与用户意识耦合传播的微分动力系统, 其能描述每个时刻信息传播的具体情况。

(2) 平衡点: 也称为不动点, 在分析动力系统局部和全局行为时十分重要^[20]。本文主要分析系统式(1)的平衡点来研究信息与用户意识耦合传播的最终状态。

(3) 有毒平衡点: 本文系统式(1)达到稳定时感染设备的数量不为零的平衡点。这表明系统处于稳定状态时, 信息会继续传播。

(4) 稳定性: 动力系统平衡点的长期行为^[20]。系统式(1)平衡点的稳定性分析有助于预测信息在D2D通信中传播规模。

3.1 系统化简

由于系统式(1)维数较高, 比较复杂, 为便于分析, 需要对它进行化简。

注意到 $N(t) = S(t) + I(t) + R(t) = U(t) + K(t)$, 系统式(1)可以转化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN(t)}{dt} &= \delta - \mu N(t) \\ \frac{dK(t)}{dt} &= \beta_1(N(t) - K(t))K(t) \\ &\quad + \beta_2(N(t) - K(t))I(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} &= L_1\alpha(N(t) - I(t) - R(t))R(t) \\ &\quad - (L_1\lambda + \gamma + \mu)I(t) + \eta R(t) + \delta_2 \\ \frac{dR(t)}{dt} &= L_1\lambda I(t) - (\eta + \gamma + \mu)R(t) + \delta_3 \end{aligned} \right\} (2)$$

其中, $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ 。

观察式(2)第1个式子可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} N(t) = \frac{\delta}{\mu}$ 。于是, 根据文献^[21]就可以得到与式(2)动力学性质完全一致的如式(3)的系统

$$\left. \begin{aligned} \frac{dK(t)}{dt} &= \beta_1(N^* - K(t))K(t) + \beta_2(N^* - K(t))I(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} &= L_1\alpha(N^* - I(t) - R(t))R(t) \\ &\quad - (L_1\lambda + \gamma + \mu)I(t) + \eta R(t) + \delta_2 \\ \frac{dR(t)}{dt} &= L_1\lambda I(t) - (\eta + \gamma + \mu)R(t) + \delta_3 \end{aligned} \right\} (3)$$

其中, $N^* = \delta/\mu$, 初始条件为 $K(0), I(0), R(0) \geq 0$ 。

根据文献^[20], 本文可以得到系统式(3)的正向不变区间为 $\Omega = \{(K(t), I(t), R(t)) | 0 \leq K(t), I(t), R(t) \leq N^*, 0 \leq I(t) + R(t) \leq N^*\}$ 。因此, 只要分析式(3)动力学行为就可以说明系统式(1)具有同样的行为。

3.2 平衡点

对于式(3), 这里主要讨论其平衡点存在性和唯一性。

定理1 式(3)存在唯一平衡点 $E^*(I^*, R^*, K^*)$ 且是有毒平衡点

$$\left. \begin{aligned} I^* &= \frac{w_1 + \sqrt{w_1^2 + 4w_0w_2}}{2w_0} \\ R^* &= \frac{L_1\lambda}{\eta + \gamma + \mu} I^* + \frac{\delta_3}{\eta + \gamma + \mu} \\ K^* &= N^* \end{aligned} \right\} (4)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} w_0 &= \frac{L_1^2 \alpha \lambda (\eta + \gamma + \mu + L_1 \lambda)}{(\eta + \gamma + \mu)^2} > 0 \\ w_1 &= \frac{(L_1 \alpha N^* + \eta) L_1 \lambda}{\eta + \gamma + \mu} - \frac{L_1 \alpha \delta_3 (\eta + \gamma + \mu + 2L_1 \lambda)}{(\eta + \gamma + \mu)^2} \\ &\quad - (L_1 \lambda + \gamma + \mu) \\ w_2 &= \frac{L_1 \alpha \delta_3}{\eta + \gamma + \mu} \left(\frac{\delta_1 + \delta_2}{\mu} + \frac{\delta_3 (\eta + \gamma)}{\mu (\eta + \gamma + \mu)} \right) \\ &\quad + \frac{\eta \delta_3}{\eta + \gamma + \mu} + \delta_2 > 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

证明 假设 $E^*(K^*, I^*, R^*)$ 为式(3)的一个平衡点。根据平衡点的定义, 把 E^* 代入式(3)可得

$$\left. \begin{aligned} \beta_1(N^* - K^*)K^* + \beta_2(N^* - K^*)I^* &= 0 \\ L_1 \alpha(N^* - I^* - R^*)R^* - (L_1 \lambda + \gamma + \mu)I^* \\ &\quad + \eta R^* + \delta_2 = 0 \\ L_1 \lambda I^* - (\eta + \gamma + \mu)R^* + \delta_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

通过方程组式(6)第1个方程可得 $K^* = N^*$ 或

$$J_{E^*} = \begin{pmatrix} \beta_1 N^* - 2\beta_1 K^* - \beta_2 I^* & \beta_2(N^* - K^*) & 0 \\ 0 & -L_1 \alpha R^* - (\lambda + \gamma + \mu) & L_1 \alpha(N^* - I^* - 2R^*) + \eta \\ 0 & L_1 \lambda & -(\eta + \gamma + \mu) \end{pmatrix} \quad (8)$$

由于 $K^* = N^*$, 则矩阵式(8)可简化为

$$J_{E^*} = \begin{pmatrix} w_3 & 0 & 0 \\ 0 & w_4 & w_5 \\ 0 & 0 & w_6 \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} w_3 &= -\beta_1 K^* - \beta_2 I^* < 0 \\ w_4 &= -L_1 \alpha R^* - (L_1 \lambda + \gamma + \mu) < 0 \\ w_5 &= L_1 \alpha(N^* - I^* - 2R^*) + \eta \\ w_6 &= -(\eta + \gamma + \mu) \\ &\quad + \frac{L_1 \lambda}{L_1 \alpha R^* + L_1 \lambda + \gamma + \mu} \\ &\quad \cdot (L_1 \alpha(N^* - I^* - 2R^*) + \eta) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$R^* = \frac{L_1 \alpha N^* - L_1 \alpha I^* + \eta}{2L_1 \alpha} + \frac{\sqrt{(L_1 \alpha N^* - L_1 \alpha I^* + \eta)^2 + 4L_1 \alpha (\delta_2 - (L_1 \lambda + \gamma + \mu)I^*)}}{2L_1 \alpha} \quad (13)$$

$$2L_1 \alpha R^* = \sqrt{(L_1 \alpha N^* - L_1 \alpha I^* + \eta)^2 + 4L_1 \alpha (\delta_2 - (L_1 \lambda + \gamma + \mu)I^*)} + L_1 \alpha N^* - L_1 \alpha I^* + \eta \quad (14)$$

于是

$$L_1 \alpha N^* - L_1 \alpha I^* + \eta - 2L_1 \alpha R^* = -\sqrt{(L_1 \alpha N^* - L_1 \alpha I^* + \eta)^2 + 4L_1 \alpha (\delta_2 - (L_1 \lambda + \gamma + \mu)I^*)} < 0 \quad (15)$$

进一步, $w_6 < 0$ 。

此时可得特征方程式(11)的3个根 $\rho = w_3, \rho = w_4, \rho = w_6$ 全为负数, 故由Lyapunov稳定性定

$K^* = 0$ 。当 $K^* = 0$ 时, $I^* = 0$, 此时不满足方程组式(6)第2个方程, 故只能是 $K^* = N^*$ 。

紧接着, 由方程组式(6)第3个方程可得 $R^* = \frac{L_1 \lambda}{\eta + \gamma + \mu} I^* + \frac{\delta_3}{\eta + \gamma + \mu}$ 。然后, 将其代入方程组式(6)第2个方程, 经整理可得

$$w_0 I^{*2} - w_1 I^* - w_2 = 0 \quad (7)$$

注意到 $K^*, I^*, R^* \geq 0$ 。故方程式(7)存在唯一的根 $I^* = \frac{w_1 + \sqrt{w_1^2 + 4w_0 w_2}}{2w_0}$ 。于是, R^* 存在且唯一。因此, 命题得证。

3.3 平衡点稳定性分析

定理1已表明式(3)存在唯一的(有毒)平衡点, 这里主要讨论其全局稳定性。首先, 需要考虑其局部稳定性。

定理2 式(3)的有毒平衡点 E^* 局部渐近稳定。

证明 式(3)在 E^* 处的Jacobi矩阵为

记 $I_{n \times n}$ 为 n 阶单位矩阵, 则 J_{E^*} 对应的特征方程为

$$\begin{aligned} \det(\rho I_{3 \times 3} - J_{E^*}) &= \begin{vmatrix} \rho - w_3 & 0 & 0 \\ 0 & \rho - w_4 & -w_5 \\ 0 & 0 & \rho - w_6 \end{vmatrix} \\ &= (\rho - w_3)(\rho - w_4)(\rho - w_6) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

注意到

$$L_1 \alpha(N^* - I^* - R^*)R^* - (L_1 \lambda + \gamma + \mu)I^* + \eta R^* + \delta_2 = 0 \quad (12)$$

则

理^[20]可得式(3)的有毒平衡点 E^* 局部渐近稳定。命题得证。

接下来, 将考虑有毒平衡点 E^* 的全局稳定性。记

$$b = -\frac{R^*}{L_1\alpha N^* - L_1\alpha I^* + \eta - 2L_1\alpha R^*} > 0 \quad (16)$$

定理3 若 $(L_1\alpha b - 1)I^* \leq \frac{\delta_3}{L_1\lambda}$, 则系统式(3)的有毒平衡点 E^* 全局渐近稳定。

证明 令 $x = K(t) - K^*$, $y = I(t) - I^*$, $z = R(t) - R^*$, 则系统式(3)可以转化为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\beta_1 x(x + K^*) - \beta_2 x(y + I^*) \\ \frac{dy}{dt} &= -L_1\alpha(y + z)(z + R^*) \\ &\quad + (L_1\alpha(N^* - I^* - R^*) + \eta)z \\ &\quad - (L_1\lambda + \gamma + \mu)y \\ \frac{dz}{dt} &= L_1\lambda y - (\eta + \gamma + \mu)z \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

构造Lyapunov函数

$$V = \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}by^2 + \frac{1}{2}cz^2 \quad (18)$$

其中, c 为待确定参量。于是

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt}|_{(3)} &= x(-\beta_1 x(x + K^*) - \beta_2 x(y + I^*)) \\ &\quad + by(-L_1\alpha(y + z)(z + R^*) \\ &\quad + (L_1\alpha(N^* - I^* - R^*) + \eta)z \\ &\quad - (L_1\lambda + \gamma + \mu)y) \\ &\quad + cz(L_1\lambda y - (\eta + \gamma + \mu)z) \\ &= -\beta_1 x^2(x + K^*) - \beta_2 x^2(y + I^*) \\ &\quad - L_1\alpha b(z + R^*)y^2 \\ &\quad + byz(L_1\alpha N^* - L_1\alpha I^* - 2L_1\alpha R^* + \eta) \\ &\quad - L_1\alpha bz^2(I(t) - I^*) - b(L_1\lambda + \gamma + \mu)y^2 \\ &\quad + cL_1\lambda yz - c(\eta + \gamma + \mu)z \\ &= -\beta_1 x^2(x + K^*) - \beta_2 x^2(y + I^*) \\ &\quad - L_1\alpha b(z + R^*)y^2 \\ &\quad + byz(L_1\alpha N^* - L_1\alpha I^* - 2L_1\alpha R^* + \eta) \\ &\quad - L_1\alpha bz^2 I(t) - b(L_1\lambda + \gamma + \mu)y^2 + cL_1\lambda yz \\ &\quad + (L_1\alpha b I^* - c(\eta + \gamma + \mu))z^2 \quad (19) \end{aligned}$$

令 $c = \frac{R^*}{L_1\lambda} > 0$, 注意到 $byz(L_1\alpha N^* - L_1\alpha I^* - 2L_1\alpha R^* + \eta) + cL_1\lambda yz = 0$, 则式(19)可进一步简化为

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt}|_{(3)} &= -(\beta_1 K(t) + \beta_2 I(t))x^2 \\ &\quad - (L_1\alpha b R(t) + b(L_1\lambda + \gamma + \mu))y^2 \\ &\quad - L_1\alpha b I(t)z^2 \\ &\quad - \left(\frac{R^*}{L_1\lambda}(\eta + \gamma + \mu) - L_1\alpha b I^* \right)z^2 \quad (20) \end{aligned}$$

注意到 $\frac{R^*}{L_1\lambda}(\eta + \gamma + \mu) - L_1\alpha b I^* = \frac{\delta_3}{L_1\lambda} - (L_1\alpha b - 1)I^*$, 故当 $(L_1\alpha b - 1)I^* \leq \frac{\delta_3}{L_1\lambda}$ 时, $\frac{dV}{dt}|_{(3)} < 0$ 总是成立。因此, 根据LaSalle不变原理^[20], 有毒平衡点 E^* 全局渐近稳定, 命题得证。

4 实验分析

为进一步分析D2D通信中信息与用户意识耦合传播规律以及验证所得理论结果, 本节将采用Matlab软件(版本为Matlab2018a)进行实验。在此之前, 需先介绍评价指标。此外, 系统参数设置如表2所示。

最大感染峰值(Max Infection Peak, MIP)^[22]: 指网络中感染节点到达峰值时占总节点数比例, 用于表征信息传播速度, MIP越大, 信息在单位时间内的传播规模越大。

4.1 稳定性验证

在理论分析基础上, 本节将从两个方面验证本文模型的稳定性: (1)在相同系统参数下设置不同初始条件(见图3); (2)在相同初始条件下设置不同系统参数(见图4)。

(1) 在系统参数为 $\alpha = 0.02$, $\lambda = 0.04$, $\eta = 0.02$, $\beta_1 = 0.0002$, $\gamma = 0.08$, $\mu = 0.08$, $\delta_1 = 6$, $\delta_2 = 5$, $\delta_3 = 4$ 下, 给定初始条件如下:

- (a) $(I(0), K(0), S(0), I(0), R(0)) = (100, 50, 120, 20, 10)$;
- (b) $(I(0), K(0), S(0), I(0), R(0)) = (190, 60, 200, 30, 20)$;

表2 参数设置

参数	值
β_1	0.002
β_2	0.012
α	0.02
λ	0.02
η	0.02
γ	0.08
μ	0.08
δ_1	4
δ_2	3
δ_3	2

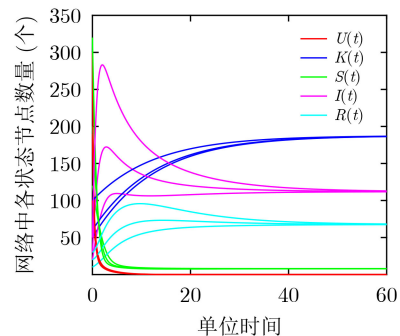


图3 不同初始条件下式(1)演化情况

(c) $(I(0), K(0), S(0), I(0), R(0)) = (300, 100, 320, 50, 30)$.

图3描述了系统式(1)在不同初始条件下的演化过程。可以看出，代表不同初始条件的曲线最终会趋于同一稳定水平。这意味着平衡是独立于初始条件，即系统演化行为不受初始条件的影响，从而可以预测信息传播的长期行为。因此，理论和实验结果都证明了随机选取的初始条件是可行的。

(2) 在初始条件为 $(I(0), K(0), S(0), I(0), R(0)) = (100, 50, 120, 20, 10)$ 下，给定系统参数如下：

(a) $\beta_1 = 0.002, \alpha = 0.02, \lambda = 0.02, \eta = 0.02, \gamma = 0.08, \mu = 0.08, \delta_1 = 6, \delta_2 = 5, \delta_3 = 4, p = 0.5, L_2 = 0.5$;

(b) $\beta_1 = 0.002, \alpha = 0.02, \lambda = 0.04, \eta = 0.02, \gamma = 0.06, \mu = 0.08, \delta_1 = 6, \delta_2 = 4, \delta_3 = 2, p = 0.6, L_2 = 0.6$;

(c) $\beta_1 = 0.002, \alpha = 0.02, \lambda = 0.06, \eta = 0.02, \gamma = 0.08, \mu = 0.08, \delta_1 = 5, \delta_2 = 3, \delta_3 = 2, p = 0.7, L_2 = 0.5$.

图4显示了式(1)在不同系统参数条件下的演化过程。可以看出，系统参数直接影响系统的动态演化过程。信息传播过程不会消失，但可以通过调整参数在一定程度上加以控制。这也说明通过参数分析进行传播控制是可行和必要的。

4.2 参数分析

本节主要考虑转发率和过程影响因子对信息传播影响。系统参数取值如表2所示，初始条件为 $(I(0), K(0), S(0), I(0), R(0)) = (100, 50, 120, 20, 10)$ 。

(1) 转发率影响。图5刻画了转发率 $\lambda (L_1 = e^{0.5}, L_2 = 0.6)$ 的变化对 I 状态设备数量的影响。可以看出，当转发率 λ 增加时， I 状态设备数量将随之减少，峰值也更低，并且最终的感染设备数量将趋近于稳定水平且不为0，该实验结果与定理1和定理3的结论完全相符。这可解释为：当用户认为信息有用时，会更愿意转发信息，从而处于仅接收状态设备数量减少，信息传播规模增加。由系统稳定时感染节点 I^* 的表达式可知， I^* 的大小与 λ 变化成反比，故 λ 增大时， I^* 减小，峰值也更低，此时感染率不变，因此到达峰值的时间更短。对于 $\lambda = 0$,

感染设备不向转发设备变化，导致转发设备数量较少，而易感设备向感染设备转发受转发设备数量影响，此时感染率减小，故达到峰值的时间反而变长。

另外， I 状态设备数量整体变化幅度较小，并且 $\lambda = 0$ 时峰值略低于 $\lambda = 0.02$ ，达到稳定时差距也很小。这可解释为：当转发率为零时，虽然 I 状态不会转变成 R 状态，但是 S 状态设备由于系统中转发设备较少，转化为感染状态的概率更低。而当转发率较低时，虽然一部分 I 状态设备转化成 R 设备，但是同样转发设备数量增加会导致未接收设备有更大概率接收信息，从而间接使 I 状态设备数量增加。故不难看出 I 状态设备数量减少幅度较小。

(2) 过程因子影响。这里讨论本文所定义的影响因子 L_1 和 L_2 由于 $L_1 = e^\phi$ ，故通过 ϕ 来说明 L_1 影响。

图6显示了接收信息设备数量(感染状态 I 和转发状态 R 设备数量之和)随 $\phi (L_2 = 0.6)$ 的变化关系。可以看出，接收设备数量随 ϕ 增加而增加最终趋于稳定水平，并且相同时间接收信息设备数量更多。但是，随着数量增加到一定水平趋势放缓进而不再增加。该现象可归结为过程因子作用机制。较大的 ϕ 会使设备间信息传输率增加，从而促使设备接收信息的概率增加，但随着感染设备增多，易感设备更大可能受到周围感染设备影响，此时用户意识扩散的影响会很小。未知用户不会影响设备间正常信息传输，而用户意识扩散可促进或抑制信息传播。因此，用户尽早干预可更有效地控制信息传播。

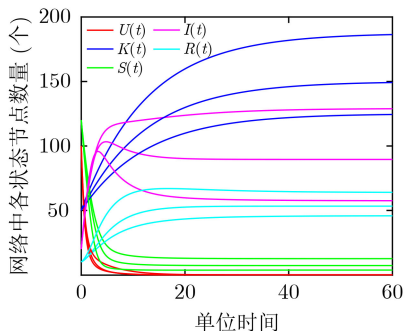


图4 不同系统参数下式(1)演化情况

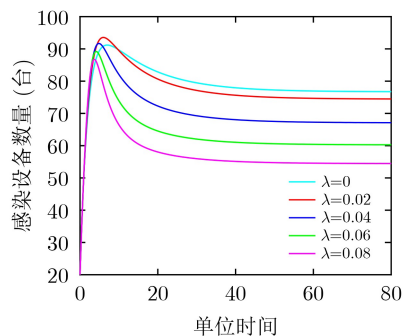


图5 不同 λ 对感染设备 I 数量的影响

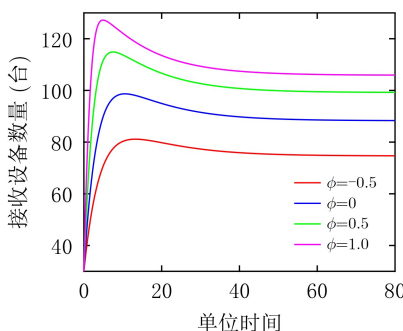


图6 不同 ϕ 对接收设备数量的影响

图7展示了过程影响因子 L_2 ($L_1 = e^{0.5}$)的变化对已知用户数量影响。可以看出,随着 L_2 增大,相同时间内得知信息的用户更多,即信息传播规模更大。但是 L_2 越大,影响越不明显。当 $L_2 = 0$ 时,已知用户数量的增加速度明显降低。这是因为随着 L_2 增大,设备自身造成的延迟效应更小,用户通过设备得知信息的概率越接近设备间信息传输率,此时过程因子的影响变小。此外,当 $L_2 = 0$ 时,表明D2D连接中断导致用户主要通过和邻居用户交互得知信息,交互频率显著降低,用户意识扩散速度下降。

图6和图7的结果进一步验证了所提过程影响机制的有效性,对比二者不难看出,用户对设备的影响要大于设备对用户的影响。原因在于用户意识扩散受外部环境影响较大,具有更大的不确定性,而设备间的信息传输率仅仅只能影响用户接收信息的速率,信息内容和用户自身偏好将进一步决定信息是否被转发。

(3) 用户意识影响。图8说明了用户有(无)意识对信息扩散的影响。其中, $L_2 = 0.6$ 。可以看出,所提模型不管有或无用户意识, MIP均随着 ϕ 的增大而增大。这是因为对于有用信息,用户更愿意参与转发,从而提高信息传输率,感染设备也会增多。另外,本文所研究模型的MIP整体上高于无意识模型,原因在于存在意识影响时,用户短时间不会遗忘信息,故保留信息的概率更大,从而导致设备间信息传播概率更大。

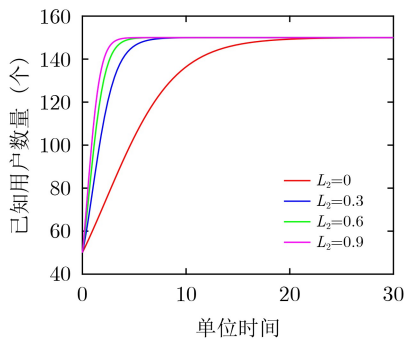


图7 不同 L_2 对已知用户数量的影响

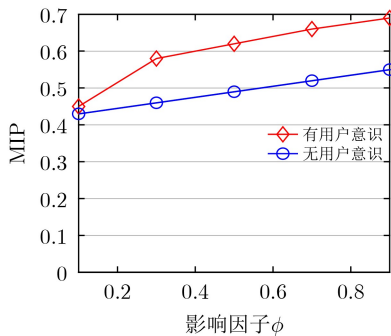


图8 有(无)用户意识模型MIP对比

4.3 模型对比

为了进一步验证所提模型的有效性,接下来将与传统传播模型^[15]和最新传播模型^[16]进行对比。

文献^[15]中的传播模型也将用户及其设备当作一个节点,这些节点分为3种状态: S (易感), I (感染), R (恢复)。故传统模型用微分方程表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_2(t)}{dt} &= \delta_1 - \alpha S_2 I_2 - \beta_1 S_2 R_2 + \gamma R_2 - \mu S_2 \\ \frac{dI_2(t)}{dt} &= \delta_2 + \alpha S_2 I_2 + \beta_1 S_2 R_2 - \lambda I_2 + \eta R_2 - \mu I_2 \\ \frac{dR_2(t)}{dt} &= \delta_3 + \lambda I_2 - \eta R_2 - \gamma R_2 - \mu R_2 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

文献^[16]中的传播模型未考虑过程影响,将用户及其设备看成整体作为一个节点,每个节点处于4种状态之一:US(未知-易感),KS(已知-易感),KI(已知-感染),KR(已知-转发)。故该传播模型可用微分方程表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dUS(t)}{dt} &= -\beta_1 US(t)KS(t) - \beta_2 US(t)KI(t) + \delta_1 \\ &\quad - \mu US(t) \\ \frac{dKS(t)}{dt} &= \beta_1 US(t)KS(t) + \beta_2 US(t)KI(t) \\ &\quad - \alpha KS(t)KR(t) + \gamma KI(t) + \gamma KR(t) \\ &\quad + \delta_1 - \mu KS(t) \\ \frac{dKI(t)}{dt} &= \alpha KS(t)KR(t) - \lambda KI(t) - \gamma KI(t) \\ &\quad + \eta KR(t) + \delta_2 - \mu KI(t) \\ \frac{dKR(t)}{dt} &= \lambda KI(t) - \eta KR(t) - \gamma KR(t) + \delta_3 \\ &\quad - \mu KR(t) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

根据各节点含义可知,3种模型中节点数量对应关系为

$$\left. \begin{aligned} U(t) &= US(t) = S_2(t) \\ K(t) &= KS(t) + KI(t) + KR(t) = I_2(t) + R_2(t) \\ S(t) &= US(t) + KS(t) = S_2(t) \\ I(t) &= KI(t) = I_2(t) \\ R(t) &= KR(t) = R_2(t) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

给定 $L_1 = e^{0.5}$, $L_2 = 0.6$,其他系统参数取值见表2。3个传播模型的节点初始条件分别为 $(U(0), K(0), S(0), I(0), R(0)) = (100, 50, 120, 20, 10)$, $(US(0), KS(0), KI(0), KR(0)) = (100, 20, 20, 10)$, $(S_2(0), I_2(0), R_2(0)) = (120, 20, 10)$ 。在此条件下进行了3个实验,其结果分别如图9、图10、图11所示。

在图9中, $K_1(t)$, $I_1(t)$ 和 $K_2(t)$, $I_2(t)$ 分别为由关系式(23)得到的代表系统式(21)和系统式(22)中相关节点的数量, $K(t)$, $I(t)$ 代表系统式(1)中的相

关节点数量。可以看出，在系统达到稳定时，所提模型中已知用户数量趋于更高水平，并且相同时间传播的用户数量更多。这表明所提模型中信息传播速度更快，规模更大。除此之外，本文模型达到稳定时I状态设备数量更少，反映了用户意识扩散影响信息传输，进而影响设备间信息传播率。这是因为当存在用户意识扩散时，用户会根据信息反馈调整决策，进而在一定程度上干扰设备间信息传输。当信息为有用信息时，用户更愿意转发信息，导致设备变成转发状态；当信息为无用信息时，用户阻止信息进一步传播，导致更少的易感设备接收到信息。

图10给出了3种模型在不同 α 下MIP对比。随着传输速率 α 增加，3种模型的MIP都呈上升趋势，但是所提模型的MIP总是高于最新模型^[16]和传统模型^[15]，并且最新模型也高于传统模型，这是因为设备间信息传输速率增加会使得单位时间接收信息设备数量增加，从而提高用户得知信息的概率。这也说明了相同时间内所提模型信息传播规模更大，并且考虑了用户社交属性的传播模型优于传统模型。

图11展示了3种模型在不同 λ 下MIP对比。随着转发率 λ 增加，3种模型的MIP都呈下降趋势，而所提模型的MIP仍总是高于最新模型^[16]和传统模型^[15]。此外， λ 的变化对所提模型的MIP影响较小，对传统模型的影响最大。原因在于当转发设备增多时，会间接使得易感设备有更大概率收到信息转化为感

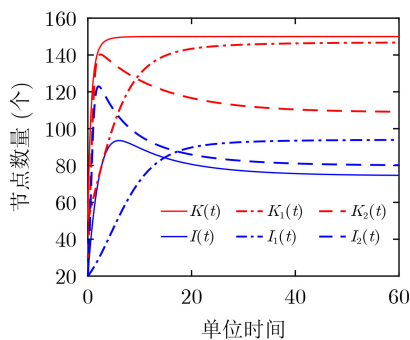


图9 模型演化对比结果

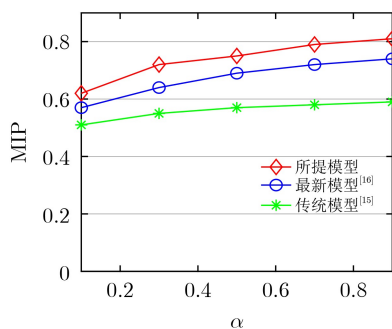


图10 不同 α 下MIP对比

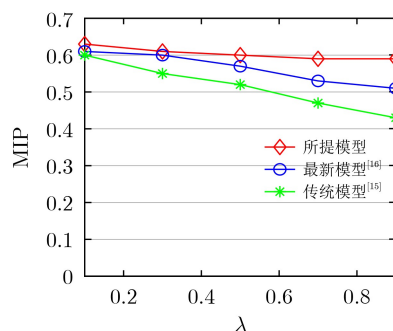


图11 不同 λ 下MIP对比

染设备，从而使感染设备数量增加，故MIP减少趋势不明显。这也和图5中的结论相符，也进一步说明了在所提模型中，当感染设备数量较多时，设备能很快收到来自多方的信息，即被其他设备感染的概率较大，此时用户意识扩散对设备影响较小。

5 结论

针对D2D通信中信息与用户意识相互影响，共同演化的特点，本文将信息传输过程与用户意识扩散过程进行综合分析，引入过程影响因子刻画二者间相互作用，建立了信息与用户意识耦合传播动力学模型。通过理论分析发现系统存在唯一(有毒)平衡点，进而证明了平衡点的全局稳定性并说明了其与D2D通信中信息传播状态的关系。最后，实验分析表明，相比于传统模型和未考虑过程影响的传播模型，所提模型不仅能有效提高信息传播规模，还能更准确地模拟信息传播过程。

参考文献

- [1] CAO Jin, MA Maode, LI Hui, et al. A survey on security aspects for 3GPP 5G networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(1): 170–195. doi: 10.1109/COMST.2019.2951818.
- [2] PEDHADIYA M K, JHA R K, and BHATT H G. Device to device communication: A survey[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2019, 129: 71–89. doi: 10.1016/j.jnca.2018.10.012.
- [3] NITTI M, STELEA G A, POPESCU V, et al. When social networks meet D2D communications: A survey[J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 396. doi: 10.3390/s19020396.
- [4] 王璐, 王熠晨. 具有社交意识的D2D网络安全协作传输策略[C]. 2017-2019年“学术金秋”获奖论文集, 西安, 2020: 110–114. doi: 10.26914/c.cnkihy.2020.007341.
WANG Lu and WANG Yichen. D2D network security cooperative transmission strategy with social awareness[C]. 2017-2019 "Academic Autumn" Award Collection, Xi'an, China, 2020: 110–114. doi: 10.26914/c.cnkihy.2020.007341.
- [5] 张灿, 史鑫, 王萌. 社交感知的D2D内容安全缓存算法[J]. 计算

- 机科学, 2019, 46(10): 167–172. doi: [10.11896/jsjcx.180901776](https://doi.org/10.11896/jsjcx.180901776).
- ZHANG Can, SHI Xin, and WANG Meng. Social-aware D2D secure caching algorithm[J]. *Computer Science*, 2019, 46(10): 167–172. doi: [10.11896/jsjcx.180901776](https://doi.org/10.11896/jsjcx.180901776).
- [6] ZHANG Qi, ZHANG Zufan, ZENG Tian, *et al.* Modeling and analysis of dynamic social ties in D2D collaborative video transmission[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2020, 2020: 1915840. doi: [10.1155/2020/1915840](https://doi.org/10.1155/2020/1915840).
- [7] YI Yinxue, ZHANG Zufan, YANG L T, *et al.* Reemergence modeling of intelligent information diffusion in heterogeneous social networks: the dynamics perspective[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2021, 8(2): 828–840. doi: [10.1109/TNSE.2020.2975112](https://doi.org/10.1109/TNSE.2020.2975112).
- [8] 徐少毅, 张鹏. D2D协作通信网络中基于社交信息的中继选择和功率分配[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(5): 1142–1149. doi: [10.11999/JEIT160746](https://doi.org/10.11999/JEIT160746).
- XU Shaoyi and ZHANG Peng. Social network information based relay selection and power allocation in D2D communication systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1142–1149. doi: [10.11999/JEIT160746](https://doi.org/10.11999/JEIT160746).
- [9] SCATÀ M, DI STEFANO A, LA CORTE A, *et al.* A multiplex social contagion dynamics model to shape and discriminate D2D content dissemination[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(2): 581–593. doi: [10.1109/TCCN.2020.3027697](https://doi.org/10.1109/TCCN.2020.3027697).
- [10] ZHANG Zufan, LIU Anqi, YI Yinxue, *et al.* Exploring the dynamical behavior of information diffusion in D2D communication environment[J]. *Security and Communication Networks*, 2020, 2020: 8848576. doi: [10.1155/2020/8848576](https://doi.org/10.1155/2020/8848576).
- [11] SANG Chunyan and LIAO Shigen. Modeling and simulation of information dissemination model considering user's awareness behavior in mobile social networks[J]. *Physica A:Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 537: 122639. doi: [10.1016/j.physa.2019.122639](https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122639).
- [12] ZHOU Yinzu, ZHOU Jie, CHEN Guanrong, *et al.* Effective degree theory for awareness and epidemic spreading on multiplex networks[J]. *New Journal of Physics*, 2019, 21(3): 035002. doi: [10.1088/1367-2630/ab0458](https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab0458).
- [13] 魏静, 黄阳江豪, 朱恒民. 基于耦合网络的社交网络舆情传播模型研究[J]. *现代情报*, 2019, 39(10): 110–118. doi: [10.3969/j.issn.1008-0821.2019.10.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0821.2019.10.013).
- WEI Jing, HUANG Yangjianghao, and ZHU Hengmin. Research on public opinion communication model of social network based on coupling network[J]. *Journal of Modern Information*, 2019, 39(10): 110–118. doi: [10.3969/j.issn.1008-0821.2019.10.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0821.2019.10.013).
- [14] YI Yinxue, ZHANG Zufan, and GAN Chenquan. The outbreak threshold of information diffusion over social-physical networks[J]. *Physica A:Statistical Mechanics and its Applications*, 2019, 526: 121128. doi: [10.1016/j.physa.2019.121128](https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121128).
- [15] ZHANG Yuexia and PAN Dawei. Layered SIRS model of information spread in complex networks[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2021, 411: 126524. doi: [10.1016/j.amc.2021.126524](https://doi.org/10.1016/j.amc.2021.126524).
- [16] YI Yinxue, ZHANG Zufan, YANG L T, *et al.* Social interaction and information diffusion in social Internet of Things: Dynamics, cloud-edge, traceability[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(4): 2177–2199. doi: [10.1109/JIOT.2020.3026995](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3026995).
- [17] WANG Zhishuang, GUO Quantong, SUN Shiwen, *et al.* The impact of awareness diffusion on SIR-like epidemics in multiplex networks[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2019, 349: 134–147. doi: [10.1016/j.amc.2018.12.045](https://doi.org/10.1016/j.amc.2018.12.045).
- [18] XIA Chengyi, WANG Zhishuang, ZHENG Chunyuan, *et al.* A new coupled disease-awareness spreading model with mass media on multiplex networks[J]. *Information Sciences*, 2019, 471: 185–200. doi: [10.1016/j.ins.2018.08.050](https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.08.050).
- [19] HÉBERT-DUFRESNE L, MISTRY D, and ALTHOUSE B M. Spread of infectious disease and social awareness as parasitic contagions on clustered networks[J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(3): 033306. doi: [10.1103/PhysRevResearch.2.033306](https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.033306).
- [20] ROBINSON R C. An Introduction to Dynamical Systems: Continuous and Discrete[M]. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [21] THIEME H R. Asymptotically autonomous differential equations in the plane[J]. *Rocky Mountain Journal of Mathematics*, 1993, 24(1): 351–380. doi: [10.1216/rmj/1181072470](https://doi.org/10.1216/rmj/1181072470).
- [22] GAN Chenquan, LI Xiaoke, WANG Lisha, *et al.* The impact of user behavior on information diffusion in D2D communications: A discrete dynamical model[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2018, 2018: 3745769. doi: [10.1155/2018/3745769](https://doi.org/10.1155/2018/3745769).
- 甘臣权: 男, 1987年生, 副教授, 研究方向为网络传播动力学、深度学习、区块链、大数据建模分析。
- 刘安祺: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为网络传播动力学、D2D通信。
- 张祖凡: 男, 1972年生, 教授, 研究方向为无线通信、移动社交网络、机器学习。
- 祝清意: 男, 1987年生, 副教授, 研究方向为网络安全动力学、复杂系统、区块链。